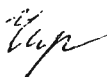


0-793704

На правах рукописи

ЧИРИКОВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ



ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Специальность 01.04.02 – Теоретическая физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург 2012

Работа выполнена на кафедре математической физики ФГАОУ ВПО  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор  
Зубарев Андрей Юрьевич

Официальные оппоненты – доктор химических наук, профессор  
Вшивков Сергей Анатольевич  
доктор физико-математических наук, профессор  
Налетова Вера Арсеньевна

Ведущая организация – Институт механики сплошных сред УрО РАН

Защита состоится **27 марта 2012 г., в 15.00 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.285.13 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, аудитория 1 главного учебного корпуса (зал ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» <http://ustu.ru> и на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ [referat\\_vak@mon.gov.ru](mailto:referat_vak@mon.gov.ru)

Отзыв на автореферат в одном экземпляре с подписью составителя, заверенный гербовой печатью, просим направить по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ученому секретарю университета.

Автореферат разослан

20 февраля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.285.13, к. ф.-м. н., профессор



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования** обусловлена отсутствием в литературе теоретических моделей, которые были бы способны, хотя бы с принципиальных позиций, объяснить сильные вязкоупругие эффекты, обнаруженные в экспериментах с магнитными жидкостями различной природы.

Диссертация посвящена теоретическому исследованию реологических свойств нанодисперсных магнитных жидкостей. Магнитных жидкостей в природе не существует, все естественные жидкие и газообразные среды очень слабо взаимодействуют с магнитным полем. Тем не менее, известны многочисленные примеры искусственно синтезированных жидких и дисперсных сред, взаимодействующих с магнитным полем из-за своей способности к намагничиванию.

Магнитные жидкости (феррожидкости) представляют собой коллоидные взвеси однодоменных ферромагнитных частиц в немагнитной жидкой среде. Диаметр частиц в типичных феррожидкостях варьируется в пределах 7-20 нм. Чтобы избежать необратимой коагуляции частиц, они покрываются специальными стабилизирующими слоями. В зависимости от типа феррожидкости, эти слои могут состоять из молекул поверхностно активных веществ, или иметь ионную структуру.

В последние, примерно, десять лет стационарные магнитовязкие эффекты в феррожидкостях, соответствующие постоянной скорости течения среды и постоянному магнитному полю, исследовались как экспериментально, так и теоретически. Их физическая природа, хотя бы на принципиальном уровне, выяснена и изучена. Установлено, что причиной этих эффектов является объединение частиц феррожидкости в линейно-цепочечные или объемно-капельные гетерогенные агрегаты, вытянутые вдоль приложенного магнитного поля (см., например, обзоры в [1,2]).

Вязкоупругие эффекты и свойства феррожидкостей, проявляющиеся при нестационарных течениях этих систем, вызывают большой интерес, как с общенаучной, так и с практической точек зрения. По сравнению со стацио-

нарными эффектами, вязкоупругие явления экспериментально изучены слабее, теоретического объяснения они до сих пор не получили.

### **Цель работы**

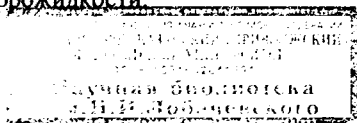
Построение теории вязкоупругих свойств нанодисперсных феррожидкостей и объяснение экспериментально обнаруженных сильных вязкоупругих эффектов в этих системах. Прежде всего – больших времен реологической релаксации, на несколько десятичных порядков превышающих времена, предсказываемые классическими теориями динамических свойств феррожидкостей.

### **Этапы работы**

- Разработка программы численных вычислений функции распределения цепочек по размерам по модели кинетики роста цепочечных агрегатов в магнитных жидкостях, расчета нелинейных реологических свойств этих систем.
- Теоретическое исследование релаксации вязкости магнитной жидкости после скачкообразного изменения скорости сдвига. Установление зависимости времени реологической релаксации феррожидкости от величины и характера изменения скорости сдвигового течения.
- Исследование реологических свойств полидисперсной феррожидкости в рамках простейшей бидисперсной модели.
- Расчет реологических свойств магнитных жидкостей с композитными частицами.

### **Научная новизна**

- Предложена модель кинетики роста цепочечных агрегатов, а также влияния этого процесса на реологические свойства феррожидкостей. На основании этой модели рассчитана динамика функции распределения по числу частиц в цепочке после изменения внешнего магнитного поля и (или) скорости сдвигового течения феррожидкости.



- Теоретически рассчитана релаксация вязкости магнитной жидкости после скачкообразного изменения скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ . Показано, что время релаксации сложным образом зависит от величины и характера изменения скорости сдвига.
- В рамках простейшей бидисперсной модели оценены магнитореологические свойства полидисперсной феррожидкости с цепочечными агрегатами.
- Для феррожидкости с кластерными частицами получены количественные оценки магнитовязкого эффекта и дано качественное объяснение экспериментально обнаруженных вязкоупругих эффектов.

#### **Практическая значимость**

- Предложенная модель эволюции цепочечных агрегатов может быть использована в качестве основы для дальнейшего изучения реологических свойств феррожидкостей и других магнитных суспензий.
- Эта модель позволяет прогнозировать реологическое поведение многих типов феррожидкостей в условиях современных технологий. В свою очередь это позволяет вырабатывать рекомендации по целенаправленному синтезу феррожидкостей для конкретных технологий и оптимальному их практическому применению.

#### **Автор защищает**

- Физическую модель вязкоупругости магнитных жидкостей.
- Вывод системы кинетических уравнений Смолуховского для цепочечных агрегатов.

**Личный вклад автора.** Численное решение системы кинетических уравнений для функции распределения по числу частиц в цепочечных агрегатов; решение уравнения Фоккера-Планка для функции распределения по ориентациям цепочек; вычисление эффективной вязкости, времен релаксации и других реологических характеристик магнитной жидкости.

**Достоверность** результатов исследования определяется соответствием полученных в диссертации теоретических результатов экспериментальным данным, переходу, в предельных случаях, полученных результатов в результаты, известные из литературы.

**Апробация.** Материалы диссертации представлялись и докладывались на следующих конференциях.

- 14-ая Международная «Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям» – (ИГЭУ, Плес, 2010).
- Всероссийская конференция молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах» – (ПШУ, Пермь, 2010).
- XVII «Зимняя школа по механике сплошных сред» – (ИМСС УрО РАН, Пермь, 2011).
- XXI Российская молодежная научная конференция «Проблемы теоретической и экспериментальной химии» – (УрГУ, Екатеринбург, 2011).
- XI Научно-практическая конференция «Дни науки – 2011. Ядерно-промышленный комплекс Урала» – (ОТИ НИЯУ МИФИ, Озерск, 2011).
- 7th «Annual European Rheology Conference» – (Суздаль, 2011).
- «Moscow International Symposium of Magnetism» – (МГУ, Москва, 2011).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК: «Журнал теоретической и экспериментальной физики», «Коллоидный журнал», «Physical Review», «Journal of Magnetism and Magnetic Materials».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 105 наименований и содержит 102 страницы, 38 рисунков.

**Автор выражает благодарность:** научному руководителю профессору, д.ф.-м.н. Зубареву А.Ю. и всему коллективу кафедры математической физики Уральского федерального университета.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении к диссертации указана цель работы, обоснована актуальность поставленной задачи. Приводится обзор литературы по физике и методам практического применения феррожидкостей. Отмечается отсутствие теории, которая была бы в состоянии описать экспериментально обнаруженные вязкоупругие эффекты в феррожидкостях.

**Первая глава** посвящена статистической теории феррожидкости с цепочечными агрегатами. Феррожидкость рассматривается как суспензия одноподоменных ферромагнитных сфер; постоянный магнитный момент сферы в заморожен в ее тело, поэтому изменение ориентации момента сопровождается вращением частицы. Предполагается, что в результате диполь-дипольного взаимодействия, частицы объединяются в линейно-цепочечные кластеры.

В разделе 1.1 излагаются основные допущения и приближения, используемые при построении теоретической модели феррожидкости, а именно: 1. Рассматривается монодисперсная модель. Разброс по размерам частиц, характерный для многих реальных феррожидкостей, для максимального упрощения анализа игнорируется. 2. Пренебрегается существованием других гетерофазных структур, кроме цепочных агрегатов. 3. Игнорируется флуктуационная гибкостью цепочек; они рассматриваются как прямые стержнеобразные агрегаты. 3. Предполагается, что феррожидкость настолько разрежена, что можно пренебречь взаимодействием между цепочками, в том числе взаимодействием одиночных частиц с цепочками и друг с другом.

В диссертации приводятся обоснования сделанных приближений, обсуждаются области их применимости.

Ранее выполненные исследования показывают, что сделанные сильные приближения позволяют получить оценки стационарных реологических свойств феррожидкостей, неплохо соответствующие экспериментам [1,2].

В разделе 1.2 приводится вывод стационарной функции распределения  $g_n$  по числу частиц в цепочке. Этот вывод основан на минимизации свобод-

ной энергии феррожидкости, представленной в виде функционала от  $g_n$ . При этом учитывается, что баланс сил магнитного притяжения между частицами и гидродинамическими силами, разрушающими цепочку, определяет максимально возможное число  $n_c$  частиц в цепочке. В работе используется оценка  $n_c$ , предложенная в [1]. Необходимо отметить, что принцип минимума свободной энергии, строго говоря, применим только для равновесных систем. Однако, как показывают оценки, число Пекле, построенное на цепочках, как правило, существенно меньше единицы. Следовательно, процесс формирования-разрушения цепочек в сдвиговых течениях происходит подобно тому, как это имеет место в равновесных феррожидкостях. Это позволяет использовать принцип минимума свободной энергии для приближенной оценки  $g_n$ .

**В разделе 1.3** с целью исследования эволюции ансамбля цепочек аналитически решается уравнение магнитодиффузии частиц вблизи цепочки и определяется поток свободных частиц на цепочку, обеспечивающий рост цепочек. Предполагается, что свободные частицы могут присоединяться только к конечным частицам цепочки (т.е. присоединение к боковой поверхности цепочки не учитывается); рассматривается испарение только конечных частиц, т.е. разрушение за счет теплового движения частиц. Приводится обоснование сделанных приближений.

**В разделе 1.4** при использовании результатов раздела 1.3 исследуется кинетика изменения функции распределения  $g_n$  после изменения внешнего магнитного поля и/или скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  течения феррожидкости. В рамках используемых приближений механизма роста и разрушения цепочек дается вывод системы кинетических уравнений Смолуховского, описывающих эволюцию функции  $g_n$ :

$$\frac{\partial g_n}{\partial t} = -A g_1 (g_n - g_{n-1}) + B_1 \left( \frac{B_n}{B_{n+1}} g_{n+1} - \frac{B_{n-1}}{B_n} g_n \right), \quad 1 < n < n_c. \quad (1)$$

Здесь  $A$  – коэффициент захвата цепочкой свободной частицы,  $B_n$  – коэффициенты, определяющие интенсивность десорбции частиц из цепочек.



Уравнение для  $g_1$  имеет следующую форму:

$$\frac{\partial g_1}{\partial t} = -2Ag_1^2 - Ag_1 \sum_{n=2}^{n_c-1} g_n + 2\frac{B_1^2}{B_1} g_2 + B_1 \sum_{n=3}^{n_c} \frac{B_{n-1}}{B_n} g_n. \quad (2)$$

Для числа цепочек с максимально возможным числом частиц  $n_c$  кинетическое уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial g_{n_c}}{\partial t} = Ag_{n_c-1}g_1 - B_1 \frac{B_{n_c-1}}{B_{n_c}} g_{n_c}. \quad (3)$$

Коэффициенты  $A$  и  $B_n$  в диссертации определены на основании анализа магнитодиффузионного движения одиночных частиц вблизи цепочки.

Система уравнений (1-3), является замкнутой, и автоматически удовлетворяет следующему условию:

$$\sum_{n=1}^{n_c} ng_n = C,$$

где  $C$  – постоянная величина. Из физических соображений ясно, что  $C$  равна числовой концентрации частиц в феррожидкости.

В этом разделе диссертации приводятся также начальные условия, необходимые для решения системы уравнений (1-3). Аналитически решить эту систему не удастся, поэтому она решалась численно при использовании пакета программ Mathcad.

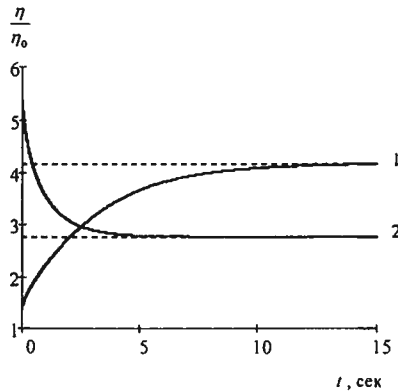
**Вторая глава** посвящена гидромеханике феррожидкостей с цепочками.

**В разделе 2.1** излагается гидродинамическая теория разбавленных суспензий применительно к феррожидкостям с цепочечными агрегатами. Цепочка, состоящая из  $n$  частиц диаметра  $d$ , моделируется как вытянутый эллипсоид вращения с малой и большой осями, равными диаметру частицы  $d$  и  $nd$  соответственно. Принципиально важно, что объем такого эллипсоида равен суммарному объему  $\pi nd^3/6$  всех частиц в цепочке.

**В разделе 2.2** при использовании известных результатов статистической гидромеханики суспензий несферических частиц, а также результатов работ по магнитовязкому эффекту, выводится выражение для эффективной

вязкости системы. При численном определении функции распределения по числу частиц в цепочке  $g_n$  из уравнений (1-3) и использовании полученных выражений для эффективной вязкости  $\eta$ , строится зависимость эффективной вязкости феррожидкости от времени.

Рисунок 1 иллюстрирует теоретическую зависимость вязкости  $\eta$  от времени при ступенчатых изменениях приложенного магнитного поля. Расчеты проведены для слабоконцентрированной феррожидкости класса *TTR*. Полученные на этом рисунке кривые соответствуют экспоненциальной зависимости безразмерной вязкости от времени.



**Рис. 1.** Зависимость безразмерной эффективной вязкости магнитной жидкости  $\eta/\eta_0$  от времени  $t$  в результате кинетики роста и испарения цепочек. Параметры системы: диаметр частицы  $d = 16$  нм; объемная концентрация частиц  $\varphi = 0,015$ ; вязкость несущей жидкости  $\eta_0 = 0,13$  Па·сек; безразмерная энергия магнитодипольного взаимодействия  $\varepsilon = 5,5$ . Цифры у кривых: 1 – в начальный момент времени безразмерное магнитное поле  $\kappa$  меняется от 0 до 3, безразмерная скорость сдвига  $\dot{\gamma}/D_r = 7 \cdot 10^{-3}$ ; 2 – в начальный момент  $\kappa$  меняется от 3 до 1 при том же отношении  $\dot{\gamma}/D_r$ . Здесь  $D_r$  – коэффициент вращательной диффузии частицы.

Рисунок 2 иллюстрирует эволюцию вязкости после скачкообразного увеличения скорости сдвига от  $\dot{\gamma}_1$  – начального значения скорости сдвига до  $\dot{\gamma}_2$  – конечного значения скорости сдвига.

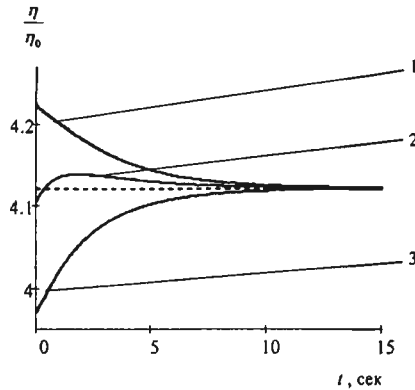


Рис. 2. Зависимость безразмерной эффективной вязкости  $\eta/\eta_0$  магнитной жидкости от времени  $t$  после скачкообразного изменения скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ . Параметры феррожидкости те же, что на рис. 1. Безразмерное магнитное поле  $\kappa = 3$ . Безразмерная скорость сдвига  $\dot{\gamma}/D_r$  меняется следующим образом: 1 –  $\dot{\gamma}_1/D = 0,7 \cdot 10^{-3}$ , 2 –  $\dot{\gamma}_1/D = 2,2 \cdot 10^{-3}$ , 3 –  $\dot{\gamma}_1/D_r = 3 \cdot 10^{-3}$ . Во всех трех случаях  $\dot{\gamma}_2/D_r = 7 \cdot 10^{-3}$ .

При фиксированном конечном значении скорости сдвига  $\dot{\gamma}_2$  (различаются начальные значения скорости сдвига) поведение вязкости неоднозначно (рисунок 2). При небольшом увеличении скорости сдвига (кривая 3) вязкость феррожидкости увеличивается со временем. Это связано с тем, что в этом случае самые длинные цепочки разрушаются, и образуется большое число коротких цепочек, которые со временем растут. Рост характерной длины цепочек ведет к росту вязкости. После большого увеличения скорости сдвига (кривая 1) вязкость, наоборот, уменьшается со временем. Это происходит из-за того, что после сильного уменьшения максимальной длины цепочки  $n_c$  и появления большого числа «обломков» длинных цепочек, эволюция цепочек ведет к уменьшению их характерной длины. При умеренном скачке (кривая 2) происходят конкурирующие явления.

В разделе 2.3 исследуется зависимость стационарной вязкости от магнитного поля и скорости сдвигового течения феррожидкости.

В диссертации показано, что теоретически рассчитанные значения эффективной вязкости ряда коммерческих феррожидкостей в магнитном поле

по порядку величины совпадают с экспериментальными, особенно при малых скоростях сдвига. Отметим, что максимальный рост вязкости феррожидкостей под действием поля, предсказываемый классическими моделями не взаимодействующих частиц, меньше измеренного магнитовязкого эффекта на несколько порядков величины.

К сожалению, провести более точное сопоставление теории и экспериментов не представляется возможным, так как феррожидкости, используемые в экспериментах, были полидисперсны, развиваемая же модель предполагает, что все частицы одинаковы. Кроме того, эксперименты были выполнены при сильных внешних полях, при которых энергия взаимодействия частиц с полем существенно больше энергии их взаимодействия друг с другом. Используемая здесь простая модель развита для противоположного случая.

**В разделе 2.4** исследуется зависимость времени вязкоупругой релаксации феррожидкости от магнитного поля, а также от величины и характера скачкообразного изменения скорости сдвигового течения феррожидкости.

На рисунке 3 приведены результаты теоретических расчетов времени релаксации  $\tau$ , а также результаты измерений [3] этого времени. Следует отметить, что, в отличие от теоретических расчетов со скачкообразным изменением скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , в экспериментах вязкоупругие эффекты исследовались с осциллирующей зависимостью скорости сдвига от времени. Параметры течения, соответствующие кривой 2, таковы, что они обеспечивают монотонное уменьшение вязкости после скачкообразного увеличения скорости сдвига.

В данном разделе также была исследована зависимость времени релаксации  $\tau$  от величины изменения скорости сдвигового течения феррожидкости. Расчеты показывают, что при ступенчатом изменении скорости сдвига время релаксации существенно зависит от ее конечного значения. Время вязкоупругой релаксации феррожидкости тем больше, чем больше конечное значение этой скорости. Это связано с тем, что после изменения скорости течения, для систем с длинными цепочками (малые скорости сдвига) переход к

новому стационарному состоянию требует больше времени, чем для систем с короткими цепочками (большая скорость сдвига).

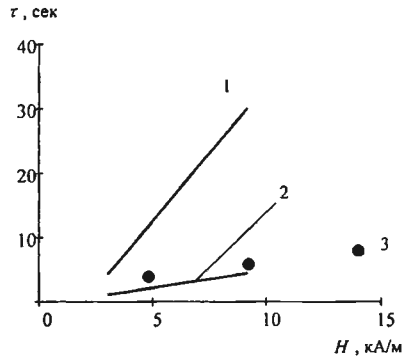


Рис. 3. Зависимость времени релаксации  $\tau$  от приложенного магнитного поля  $H$ . Параметры феррожидкости те же, что на рис. 1. Цифры у кривых: 1 – теоретические результаты, безразмерная скорость сдвига  $\dot{\gamma}/D$ , меняется от  $7 \cdot 10^{-3}$  до  $7 \cdot 10^{-4}$ ; 2 – теоретические результаты,  $\dot{\gamma}/D$ , меняется от  $7 \cdot 10^{-4}$  до  $7 \cdot 10^{-3}$ ; 3 – опытные данные [3].

При уменьшении скорости сдвига время релаксации всегда больше, чем при ее увеличении. Этот результат легко понять, так как после уменьшения скорости сдвига цепочки растут и в стационарном состоянии имеют достаточно большие размеры. При увеличении скорости сдвига вначале происходит разрыв излишне длинных цепочек, и, затем, в зависимости от ситуации, некоторый рост «обломков» или дальнейшее уменьшение характерной длины цепочек за счет испарения их частиц. Оба эти процесса требуют меньше времени, чем нужно для роста цепочек после уменьшения скорости сдвига.

Чем слабее магнитное поле, тем меньше время релаксации, так как при слабом магнитном поле размер цепочек относительно небольшой. С ростом магнитного поля длина цепочек увеличивается, эволюция ансамбля длинных цепей требует большего времени, чем коротких.

В предыдущих главах диссертации рассматривалась монодисперсная модель магнитного коллоида. Однако все реальные феррожидкости в той или

иной степени полидисперсны, часто с широким распределением по размерам частиц. К сожалению, теоретический анализ реологических свойств полидисперсной системы магнитных частиц из-за непреодолимых математических трудностей не представляется возможным.

**В третьей главе** с целью изучения принципиальных факторов влияния полидисперсности на реологические свойства феррожидкостей, рассматривается простейшая бидисперсная модель феррожидкости. Предполагается, что частицы обеих фракций существенно различаются по размерам. Только крупные частицы объединены в цепочки, которые находятся в газе одиночных, но взаимодействующих с цепочками относительно мелких частиц.

**В разделе 3.1-3.3** приведен вывод обобщенных, на случай бидисперсной модели, кинетических уравнений для функции распределения  $g_n$  по числу частиц в цепочке.

**В разделе 3.4** сравниваются результаты бидисперсной и монодисперсной модели. Исследуется зависимость динамики вязкости от относительного размера мелких частиц  $y = d_s/d$ , где  $d_s$  – диаметр малых частиц;  $d$  – диаметр крупных частиц, способных образовывать цепочки.

Присутствие малых частиц может по-разному влиять на вязкость феррожидкости. При  $y = 0,1$  доминирует стерическое взаимодействие над магнитным, поэтому присутствие малых частиц способствует росту цепочек, а, следовательно, и увеличению вязкости. При  $y = 0,5$ , наоборот, доминирует магнитное взаимодействие над стерическим, поэтому длина цепочек и вязкость системы уменьшается. Эта закономерность справедлива при различном внешнем магнитном поле и при различной скорости сдвига.

Присутствие малых частиц может также по-разному влиять и на время релаксации. При  $y = 0,1$  время релаксации становится больше по сравнению с приближением, в котором мелкие частицы игнорируются. При  $y = 0,5$ , наоборот, время релаксации уменьшается. Чем меньше размер малых частиц, тем больше длина цепочек, а значит, и время релаксации будет больше, т.к.

эволюция ансамбля длинных цепочек требует большего времени, чем коротких.

**В четвертой главе** рассматриваются реологические свойства феррожидкостей с кластерными частицами, которые состоят из однодоменных ферромагнитных наночастиц, помещенных в полимерную матрицу.

В стандартных феррожидкостях сильные магнитореологические эффекты наблюдаются только при малых скоростях сдвига. В магнитореологических суспензиях микронных намагничивающихся частиц сильные реологические эффекты наблюдаются в широком диапазоне скоростей сдвига, но эти суспензии неустойчивы по отношению к седиментации частиц. Поэтому возникает идея синтеза магнитных жидкостей, которые сочетали бы в себе седиментационную устойчивость феррожидкостей с сильными магнитореологическими свойствами. Системы с кластерными частицами удовлетворяют этим условиям.

Каждый кластер состоит из плотной системы наночастиц оксида железа, распределенной в оболочке полимера. Наночастицы формируют магнитное ядро кластера, которое окружено оболочкой чистого полимера.

**В разделе 4.1** приводится методика и результаты экспериментов (Odenbach S. и др.), проведенных над феррожидкостями с кластерными частицами

**В разделе 4.2** предложена модель системы идентичных сферических кластеров для феррожидкостей с кластерными частицами. Получены количественные оценки для магнитовязкого эффекта и качественное объяснение вязкоупругих свойств этих систем.

Стоит отметить, что в предыдущих главах предполагалось, что магнитные моменты частиц, составляющих цепочки, постоянны. Кластерные частицы, состоящие из большого числа однодоменных феррочастиц, в отсутствии внешнего магнитного поля размагничены, в присутствии же поля проявляют свойства намагничивающихся парамагнитных частиц. В этом состоит прин-

ципальное различие между собственно феррожидкостью и суспензией кластерных частиц.

Анализ показывает, что в случае цепочки, состоящей из намагничивающихся частиц, оправдано приближение, в котором моменты частиц цепочки направлены вдоль поля. Это приближение было использовано в нашей модели.

Экспериментальные и теоретические результаты стационарного магнитовязкого эффекта при различных скоростях сдвига показаны на рисунке 4. По порядку величины теоретические результаты совпадают с результатами измерений. Однако стоит отметить, что в экспериментах вязкость  $\eta$  увеличивается быстрее с магнитным полем  $H$ , чем в представленной модели. Это различие между теорией и экспериментом может быть объяснено тем, что используемая модель, ради максимального упрощения вычислений, недооценивает зависимость намагниченности кластера от магнитного поля  $H$ . Очевидно, магнитное взаимодействие между кластерами в реальной цепочке должно привести к некоторому увеличению магнитного момента кластера.

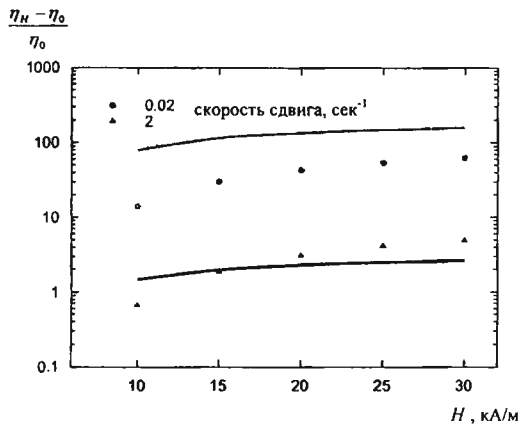


Рис. 4. Сопоставление теоретической и экспериментальной зависимости безразмерной относительной вязкости магнитной жидкости от магнитного поля при различной скорости сдвига. Сплошные линии — теоретические результаты, точки — опытные данные. Гидродинамический диаметр кластера  $D_k = 90$  нм; безразмерная энергия диполь-дипольного взаимодействия между кластерами  $\lambda = 2,3$ .



Эксперименты показывают, что время вязкоупругой релаксации в суспензиях кластерных частиц может достигать нескольких минут, что существенно больше времени релаксации феррожидкостей.

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

**В приложении** приведены математические выражения для равновесных моментов вектора ориентации  $n$ -частичной цепочки; значения кинетических коэффициентов для эффективной вязкости; численно рассчитанные параметры, входящие в выражение для безразмерной свободной энергии феррожидкости.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе предлагается модель кинетики роста цепочечных агрегатов, а также влияния этого процесса на реологические свойства феррожидкостей. Несмотря на упрощения, лежащие в основе предложенной модели, она позволяет получить оценки для величины вязкости и времени вязкоупругой релаксации феррожидкости, по крайней мере, по порядку величины, совпадающие со значениями этих величин, измеренными в экспериментах. На основании выполненных расчетов можно сделать вывод о том, что темп эволюции микроскопических цепочечных структур играет определяюще важную роль в формировании макроскопических вязкоупругих свойств этих систем.
2. Исследована зависимость вязкости магнитной жидкости от скорости сдвига и приложенного магнитного поля. Теоретические результаты качественно и по порядку величины соответствуют известным экспериментам. Многие эксперименты с магнитными суспензиями интерпретируются при помощи простого закона:

$$\eta/\eta_0 = 1 + \varphi M^{-\Delta}$$

где  $\eta$  – эффективная вязкость магнитной жидкости;  $\eta_0$  – вязкость несущей среды;  $M \propto \dot{\gamma}/H^2$  – безразмерное число Масона, равное отношению

гидродинамической силы, разрушающей связи между частицами, к силе магнитного притяжения между ними,  $\Delta$  – некоторый показатель степени.

В рамках предложенной модели, в отличие от традиционных моделей и в согласии с экспериментами, показатель  $\Delta$  не является постоянной величиной, а растет с увеличением скорости сдвига и с приложенным магнитным полем. Физической причиной зависимости показателя  $\Delta$  от скорости сдвига и магнитного поля является броуновское движение частиц и разрушение агрегатов за счет испарения из них частиц, игнорируемое в традиционных моделях магнитовязких свойств магнитных суспензий.

3. Исследована релаксация вязкости магнитной жидкости после скачкообразного изменения скорости сдвига. Показано, что время релаксации сложным образом зависит от величины и характера изменения скорости сдвига.

4. В рамках простейшей бидисперсной модели исследовались магнито-реологические свойства полидисперсной феррожидкости. Предполагалось, что сильные реологические эффекты, наблюдаемые в экспериментах, порождаются цепочечными агрегатами, образованными наиболее крупными частицами. Влияние малых частиц на реологические свойства феррожидкости существенно зависит от их относительного размера. Если размер этих частиц существенно меньше размера крупных частиц, из которых состоят цепочки, то магнито-реологический эффект, благодаря малым частицам, становится больше. Если размеры малых частиц сопоставимы с размерами крупных, присутствие малых частиц уменьшает реологические характеристики феррожидкости.

5. Феррожидкость с кластерными частицами проявляет сильные вязкоупругие свойства, индуцированные магнитным полем. Реологические явления в этих системах есть результат формирования и разрушения цепочечных агрегатов. Время вязкоупругой релаксации в этих системах может достигать нескольких минут, что должно быть принято во внимание для реологических

измерений и возможном практическом использовании феррожидкостей с сильно взаимодействующими частицами.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зубарев А. Ю., Чириков Д. Н. *К теории магнитовязкого эффекта в феррожидкостях* // ЖЭТФ. – 2010. – Т. 137, № 6, – С. 1139–1151.
2. Зубарев А. Ю., Исакова Л. Ю., Чириков Д. Н. *К нелинейной реологии магнитных жидкостей* // Коллоидный журнал. – 2011. – Т. 73, № 3, – С. 1–14.
3. Chirikov D. N, Fedotov S. P., Iskakova L. Yu., Zubarev A. Yu. *Viscoelastic properties of ferrofluids* // Phys. Rev. E – 2010. – Vol. 82, № 5. – P. 051405.
4. Borin D., Zubarev A., Chirikov D., Müller R., Odenbach S. *Ferrofluid with clustered iron nanoparticles: Slow relaxation of rheological properties under joint action of shear flow and magnetic field* // J. Magn. Magn. Mater. – 2011. – Vol. 323, № 10. – P. 1273–1277.
5. Зубарев А. Ю., Чириков Д. Н. *Вязкоупругие свойства феррожидкостей* // 14-ая Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. – Плес, 2010. – С. 89–94.
6. Зубарев А. Ю., Чириков Д. Н. *Реологические свойства феррожидкостей* // Материалы конференции НПСС-2010. – Пермь, 2010. – С. 83–86.
7. Зубарев А. Ю., Чириков Д. Н. *Вязкоупругие свойства магнитных жидкостей* // Тез. докл. XVII-ой Зимней школы по механики сплошных сред. – Пермь, 2011. – С. 130.
8. Зубарев А. Ю., Чириков Д. Н. *Вязкоупругие свойства магнитных коллоидов* // Тез. докл. XXI Российской молодежной научной конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика Н.Д. Зелинского. – Екатеринбург, 2011. – С. 450–451.

9. Зубарев А. Ю., Чириков Д. Н. *Вязкоупругие свойства феррожидкостей* // Тез. докл. XI Научно-практической Конференции Дни Науки. – Озерск, 2011. – С. 167–168.

10. Chirikov D. N., Zubarev A. Yu. *Viscoelastic properties of ferrofluids* // Book of Abstracts 7th Annual European Rheology Conference. – Suzdal, 2011. – P. 46.

11. Zubarev A. Yu., Chirikov D. N. *Viscoelastic properties of ferrofluids* // Book of Abstracts Moscow International Symposium on Magnetism. – Moscow, 2011. – P. 228.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Magnetoviscous Effects in Ferrofluids, Lectures Notes in Physics*. Edited by S. Odenbach. – Berlin-Springer, 2002.

2. *Colloidal Magnetic Fluids, Lectures Notes in Physics*. Edited by S. Odenbach. – Berlin-Springer, 2009.

3. Fleischer J. *Rheologische Eigenschaften magnetischer Flüssigkeiten unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung*. Berlin-Verlag, 2004.

---

Подписано в печать	20.01.2012	Формат 60×84 1/16
Бумага писчая	плоская печать	Усл. печ. л. 1,39
Усл. изд. л. 1,39	Тираж 100 экз.	Заказ 123

---

Размножение с готового оригинала-макета в типографии ОТИ НИЯУ МИФИ

456783, г.Озёрск, Челябинская обл., пр. Победы, 48